

文章编号: 1005-5630(2015)06-0484-07

基于激光差分探测技术的悬浮物质量浓度测量方法

侯宏录, 崔 凯, 陈海滨, 刘 凯

(西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021)

摘要: 提出了一种基于激光差分探测技术的悬浮物质量浓度测量方法, 用于测量烟雾、粉尘等空气悬浮颗粒的含量。利用悬浮颗粒对光的散射, 可以在不影响悬浮物颗粒特性的前提下, 对其实现实时在线监测。另外, 借助于参考光与测试光的直接差分放大, 可以消除激光能量起伏以及其他扰动对测量的干扰。通过对激光在悬浮物颗粒中传播时衰减原理的研究, 获取悬浮物颗粒质量浓度与光强衰减的关系, 搭建了一套激光差分探测悬浮物质量浓度的实验系统, 进行烟雾质量浓度的实际测量, 验证了该测量方法的可行性。

关键词: 悬浮物; 差分探测; 光散射

中图分类号: TN 249 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.06.004

A method for measurement of suspended matter concentration based on laser difference detection

HOU Honglu, CUI Kai, CHEN Haibin, LIU Kai

(College of Optical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: A method based on laser difference detection for measuring suspended matter concentration is introduced in the paper. It can be used for the concentration measurement of suspended particles such as smog, dust and other aerosols. Based on the light scattering effect of the suspended particles, real-time monitoring of the suspended particles without changing their properties can be achieved. By means of a direct amplification of the differential signal of the test and reference light, fluctuations of the laser energy can be reduced. The measuring principles and methods are presented in detail. Through the study of the light decaying mechanism during laser propagating in the suspended particles, the relationship between the suspended matter concentration and light intensity attenuation is deduced. We also build a laser differential detection system for the measurement of the suspended matter concentration. By measuring the smog of known concentration, practical feasibility of the measurement method is verified.

Keywords: suspended matter; difference detection; light scattering

引 言

随着工农业的发展, 大气中悬浮物的污染越来越严重, 极度危害着大气环境质量和人类健康。因此,

收稿日期: 2015-04-12

基金项目: 总装备部重点实验室研究基金项目(9140C360302120C36136)

作者简介: 侯宏录(1960—), 男, 教授, 从事光电测试、信息融合、复杂系统建模、仿真与作战效能评估方面的研究。E-mail: 1015659155@qq.com

悬浮物质量浓度的测量在环境保护、工业生产和科学研究等领域有着十分重要的意义^[1]。

目前,国内外对于粉尘质量浓度检测技术的研究越来越重视,经过对悬浮物质量浓度检测技术的多年研究,可将其质量浓度的检测方法分为两大类:非光学分析法和光学分析法。其中非光学分析法主要有黑度法、超声波技术、气敏法、热催化法等;光学分析法主要有光干涉法、差分吸收光谱技术、可调谐激光二极管激光吸收光谱技术和拉曼散射激光雷达技术等^[2]。非光学分析法已经在这一领域得到了广泛的应用,但由于检测设备响应速度慢,处理复杂,难于对悬浮物浓度进行实时监测,也无法进行遥感监测,其应用范围受到限制。

相比较于非光学分析法,基于光学分析的气体浓度检测技术具有探测灵敏度高、选择性强、可探测的气体种类多、响应速度快等特点,适合现场实时监测,成本较低,必将成为未来悬浮物质量浓度检测的理想工具。光干涉法是利用光的折射率与被测气体的含量来检测气体体积分数,测量环境,如温度、湿度、压力等会对测量结果产生较大影响。差分吸收光谱技术是根据大气中衡量气体成分在紫外和可见光谱波段的特征吸收性质来反演其种类和质量浓度^[3-4]。差分技术可消除大气湍流对信号的影响,不同污染物之间的干扰和湿度、气溶胶的干扰,能够满足连续监测的要求,但是该方法要根据吸收光谱的变化快慢对光谱进行分解,只适用于具有窄带吸收结构的气体,对不同的气体监测需要安装不同的光程和接收装置,操作过于复杂^[5]。可调谐激光二极管激光吸收光谱技术是最近发展起来的一种高灵敏、高分辨率的大气衡量气体吸收光谱检测技术,但是该方法调谐范围有限,限制了可探测的气体种类。拉曼散射激光雷达是根据激光拉曼散射光频率相对于入射光频率发生变化,产生拉曼频移,其频移量取决于大气中的气体成分而实现测量的,该方法的检测精度、线性度和信噪比还有待进一步提高。

为了能够实现对悬浮物的实时探测,使相对误差控制在15%之内,根据悬浮物颗粒对光的散射信息来测量散射颗粒的质量浓度、大小及尺寸分布情况^[6-7],提出一种基于激光差分探测的悬浮物质量浓度测量方法,采用光散射的方法进行差分检测,将单光源分为双光路既可消除检测时光强等的干扰,又避免了使用双光源检测而引入的差异,同时考虑在适当的散射模型中改变激光频率大小来观察测试结果的变化,以改善对悬浮物质量浓度的测量精度。

1 光散射测量原理

一束光强为 I_0 的激光束通过不均匀介质以后,光强会发生散射,使激光传播方向偏离,激光能量衰减^[8]。根据朗伯比尔定律,光强按照下式衰减

$$I = I_0 e^{-\tau L} \quad (1)$$

式中: τ 为介质浊度; L 为介质厚度。

在光散射过程中,通常可将烟雾颗粒等效为球形颗粒,且各个颗粒的光散射满足不相关的单散射, N 个粒径为 D ,迎光面积为 a 的单分散颗粒系,由于光散射和吸收而引起的浊度为

$$\tau = Nak_{\text{ext}} = \frac{\pi}{4} ND^2 k_{\text{ext}}(\lambda, D, m) \quad (2)$$

式中: m 是颗粒周围分散介质的折射率; k_{ext} 是当被测颗粒系存在吸收和散射时的消光系数,主要由波长 λ 、粒子半径 D 和折射率 m 来确定。

将式(2)代入式(1)后可得

$$\ln(I/I_0) = -\frac{\pi}{4} ND^2 lk_{\text{ext}}(\lambda, D, m) \quad (3)$$

式中: I/I_0 为消光或消光值。

实际情况下,被测颗粒大多不是单分散颗粒系,而是具有一定尺寸分布范围的多分散颗粒系,此时该介质的浊度为

$$\tau = \frac{\pi}{4} \int_a^b N(D) D^2 k_{\text{ext}}(\lambda, D, m) dD \quad (4)$$

将式(4)代入式(1)后可得

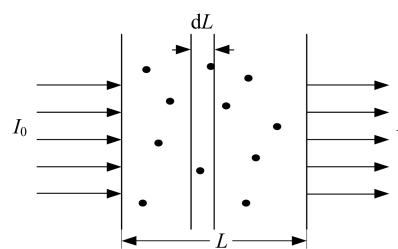


图1 光散射测量原理

Fig. 1 Measurement principle of light scattering

$$\ln(I/I_0) = -\frac{\pi}{4}l \int_a^b N(D)D^2 k_{\text{ext}}(\lambda, D, m) dD \quad (5)$$

式中： a 和 b 分别是颗粒尺寸分布的下限和上限； $N(D)$ 是以颗粒数计的尺寸分布函数。

由式(3)或式(5)可知，测得出射光与入射光强度的比值 I/I_0 后，如果已知入射光波长 λ ，光程 l 以及被测烟雾颗粒折射率 m （待测烟雾颗粒折射率为 1.42，且由于光电探测器在散射角为零的位置进行前向散射的检测，因此可认为折射率为实折射率），就可以得到待测颗粒的尺寸分布函数 $N(D)$ 和体积分数，体积分数可表示为

$$C_v = \frac{\pi}{6} \int_a^b N(D)D^3 dD \quad (6)$$

若密度 ρ 已知，则待测颗粒的质量浓度可表示为

$$M_v = C_v \cdot \rho = \frac{\pi}{6} \cdot \rho \int_a^b N(D)D^3 dD \quad (7)$$

因此，要获得悬浮物的质量浓度，就需要测量出经过悬浮物颗粒后的透射光强 I 。

2 激光差分悬浮颗粒质量浓度探测系统与差分探测电路设计

根据激光在悬浮物颗粒中传播的散射原理，当光通过不均匀介质以后，光强要发生衰减。当一束单色平行光照射到悬浮物颗粒中并传播一定长度的距离时，由于微粒的散射作用，出射光强会有一定程度的衰减，由朗伯-比尔(Lambert-Beer)光透射定律可得到出射光强与入射光强的关系。

系统总体方案如图 2 所示，采用双光路差分探测方法。该悬浮物浓度检测系统包括光源稳定控制模块、半导体激光器、 $\lambda/2$ 波片、偏振分束器、反光镜、光电差分探测器、滤波电路、A/D 转换模块、单片机等。除探测光光路暴露于测试环境之中，整个悬浮物质量浓度检测装置位于一个密闭腔体之内。半导体激光器用于产生功率稳定的线偏振激光输出。 $\lambda/2$ 波片用于调整激光的偏振方向，使之以适当的偏振角入射到偏振分束器上。偏振分束器将偏振光分为两偏振方向相互垂直的线偏振激光，配合 $\lambda/2$ 波片，可以得到功率完全相等的两束激光。一束激光作为参考光送入差分探测器的一个光电传感器上，另一束光作为探测光经过待测环境中的悬浮物后照射到差分探测器的另一个光电传感器上^[9-10]。

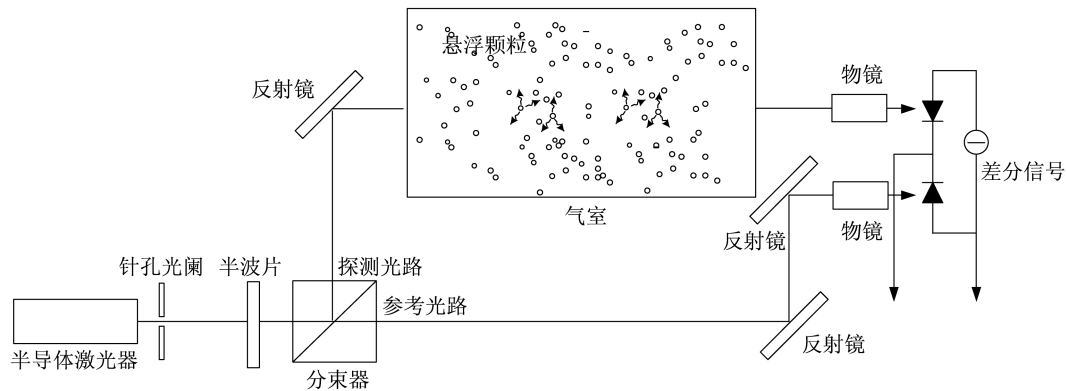


图 2 系统总体方案设计

Fig. 2 The system design

探测光光强经过测试环境中的悬浮物时会发生衰减，与未经过测试环境的参考光光强产生差分信号。光电差分探测器接收到这两路光信号后输出相应电压信号，经过放大、滤波、采样后，获得悬浮物质量浓度的观测数据。

在物质扩散之前，首先对大气环境进行测量，通过调节半波片使差分探测器输出信号为零。再在此基础上将待测物质释放并进行测量，从而可以获得悬浮物的实际质量浓度。参考光路的作用是补偿大气环境与探测光路参数不对称、温度变化对测量精度的影响。一方面用来作为未衰减光束的参考标准，另一方面可以消除激光器输出功率波动造成的测量误差。

图 3 所示的是三运放高共模抑制比光电差分放大电路，经过此电路可将光电转换后得到的两路电压信号进行差分放大，使其达到可检测范围。它由五个集成运算放大器组成，其中 AR21、AR22 为性能一致

(主要指输入阻抗、共模抑制比和增益)的同相输入的通用集成运放器,构成平衡对称差动放大输入级,AR23 构成双端输入单端输出的输出级,用来进一步抑制 AR21、AR22 的共模信号。由于该电路具有高共模抑制比,所以差分电路对温漂具有很强的抑制能力,测量结果准确度较高。电路中光电二极管输出电流约为几毫安,为了便于观测,将光电差分放大电路的放大倍数设定为 500 倍,其中光电转换模块放大 50 倍,差分放大模块放大 10 倍。

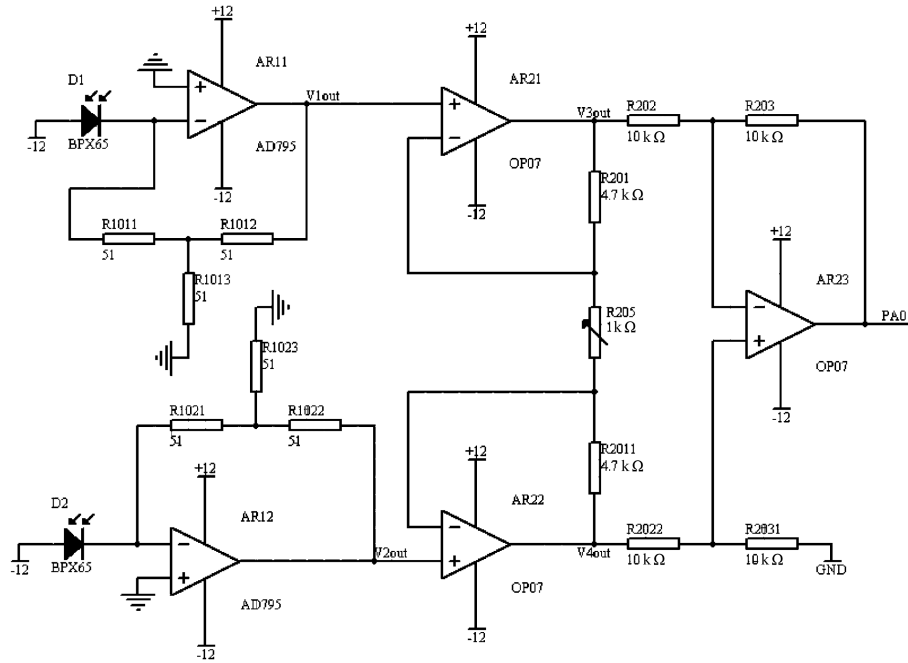


图 3 光电差分放大电路原理图

Fig. 3 The circuit of photoelectric differential amplifier

在放大电路中带宽是其性能优劣的重要指标之一,本设计需满足包含信号 90% 能量的带宽。光电转换模块中激光脉冲信号随时间变化的数学表达式为

$$I(t) = Ae^{-\beta^2 t^2} \quad (8)$$

式中: A 为脉冲峰值; $\beta = 1.66/\tau$, τ 为脉冲宽度。其激光频谱为

$$I(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} I(t)e^{-j\omega t} dt = \frac{A\sqrt{\pi}}{\beta} e^{-\omega^2/4\beta^2} \quad (9)$$

式中: ω 为角频率。包含激光脉冲信号 90% 能量 E_0 为

$$E_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\Delta\omega}^{\Delta\omega} |I(\omega)|^2 d\omega = \frac{A^2}{\beta} \sqrt{\frac{\pi}{2}} = 0.9E \quad (10)$$

式中: $\Delta\omega$ 为包含信号 90% 能量时角频率宽度的一半,即半角频宽; E 为激光信号的总能量。由式(9)、式(10)可得 $\Delta\omega = 2.8/\tau$, 即得放大电路的带宽最小应为

$$B_w = \frac{2 \times \Delta\omega}{2\pi} = \frac{0.89}{\tau} \quad (11)$$

由于激光器脉宽可调,实验中所采用的调制频率为 100 Hz,即激光信号脉冲宽度最小为 10 ms,由式(6)可得放大电路带宽应大于 89 Hz。光电转换电路中 AR21、AR22 单位增益带宽为 1.6 MHz,为了获得 50 倍的闭环增益,则运放在理论上可处理矩形脉冲信号的最大频率为 $1.6 \text{ MHz}/50 = 32 \text{ kHz}$ 。又由于差分放大模块中 AR23 增益带宽为 0.5 MHz,因此放大电路的设计满足带宽限制。

当 AR21、AR22 性能一致时,输入级的差动输出及其差模增益只与差模输入电压相关,而其共模输出、失调及漂移均在 R205 两端相互抵消,因此电路具有良好的共模抑制能力,同时不要求外部电阻匹配。为了消除 AR21、AR22 偏置电流等的影响,通常取 $R201 = R2011$ 。另外,本电路还具有增益调节功能,调节 R205 可以改变增益而不影响电路的对称性。通过 Multisim 对光电差分放大电路进行仿真,仿真结果如图 4~6 所示。

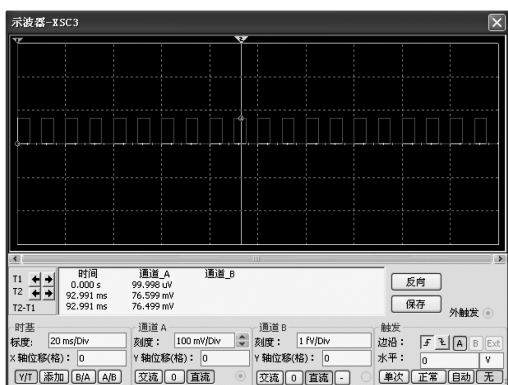


图 4 V1out 输出信号

Fig. 4 V1out output signal

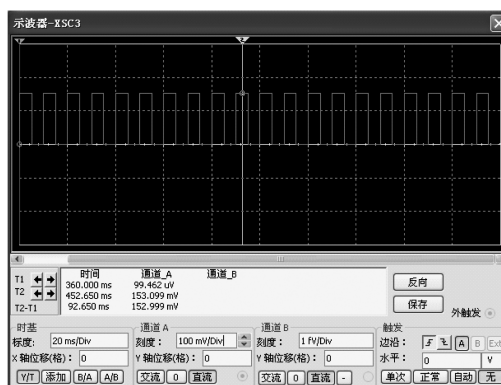


图 5 V2out 输出信号

Fig. 5 V2out output signal

由仿真结果可知 V1out 处电压脉冲值为 76.6 mV, V2out 处电压脉冲值为 153.1 mV, 经过差分放大后输出电压脉冲值为 1.515 V, 则认为光电差分放大电路可实现对差分光路的探测。

3 激光器调制频率和探测波长选择

3.1 激光调制频率选择

为了便于在示波器中观测并有利于后续电路处理, 对半导体激光器的频率进行调制, 使其输出方波信号, 即利用信号发生器产生的调制信号去改变激光器的振荡参数, 从而改变其输出特性。

在待测悬浮颗粒物质量浓度一定的情况下, 随着激光光源调制频率的变化, 会引起光信号接收装置(光电差分探测器)接收到的光信号改变, 从而使光电差分探测器输出的电压信号发生变化。为了得到理想的探测信号, 在实验之前, 首先需要确定激光光源的调制频率。分析激光光源频率与光电差分探测器输出信号之间关系时, 将探测光完全遮挡, 通过改变激光光源的输出频率, 得到光电差分探测器电压输出信号与频率的关系如图 7 所示。

由图可知, 随着激光光源频率的升高, 光电差分探测器输出信号会逐渐降低, 在 0~50 kHz 范围内输出信号与光源频率呈线性关系, 当激光频率达到 50 kHz 或者更大时, 光电差分探测器输出的电信号发生骤降, 因此 50 kHz 认为是探测器所能检测到激光信号的截止频率。最终实验中选择调制频率为 100 Hz。

3.2 最佳探测波长选取

图 8 为 BPX65 光电二极管光谱响应曲线。BPX65 作为光电探测器, 具有光谱灵敏度高, 响应速度快, 频响范围宽的特点。为了获得较高的检测灵敏度, 提高检测精度, 分别针对 405 nm、658 nm、780 nm 这三种波长的可调制半导体激光器输出光通过物质后的散射特性做了测试。由于在绝大多数情况下, 实

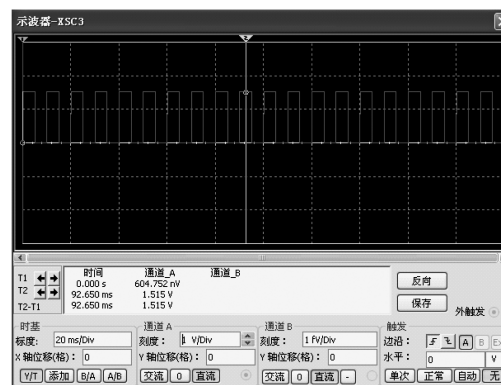


图 6 差分放大电路输出信号

Fig. 6 Output signal of amplified differential signals

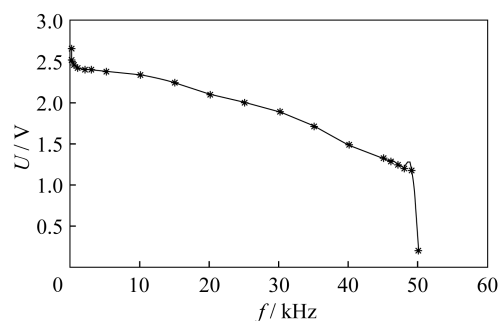


图 7 不同激光频率下的输出电信号

Fig. 7 The output electrical signal under different laser frequencies

验产生烟雾粒度成分及大小与实际测量时的烟雾颗粒成分及大小都是不相同的。不过一些典型应用场合下的烟雾颗粒成分及大小都会表现出共同的特征,因此可针对这些典型应用场合,分别进行标定,并将标定结果预置于测量电路之中。实验时选择对粒径为 $0.1\sim 2\ \mu\text{m}$ 的烟雾粒子进行标定,经过后续检测可得出激光通过烟雾后所显现的共同特征。测试中物质的标准质量浓度由质量浓度标定仪给出。标定仪测量范围为 $0\sim 500\ \text{mg}/\text{m}^3$,测量精度为 $\pm 1\%$ 。经过对烟雾质量浓度检测,分别得到了输出电压随质量浓度变化的关系,并对测试结果做了非线性拟合,如图 9 所示。

对图 9 分析计算可知,测试点实测值与拟合曲线间的均方误差对于 $\lambda=405\ \text{nm}$ 激光器为 37.53% , $658\ \text{nm}$ 为 6.45% , $780\ \text{nm}$ 为 13.78% 。将图 6 中三种拟合曲线对标准质量浓度求导,根据求导

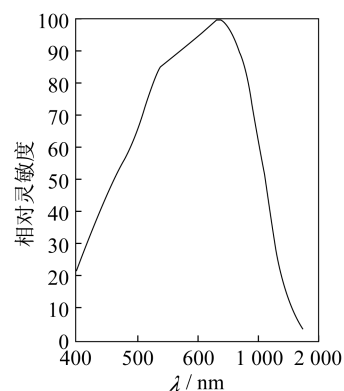


图 8 BPX65 的响应曲线

Fig. 8 The response curve of BPX65

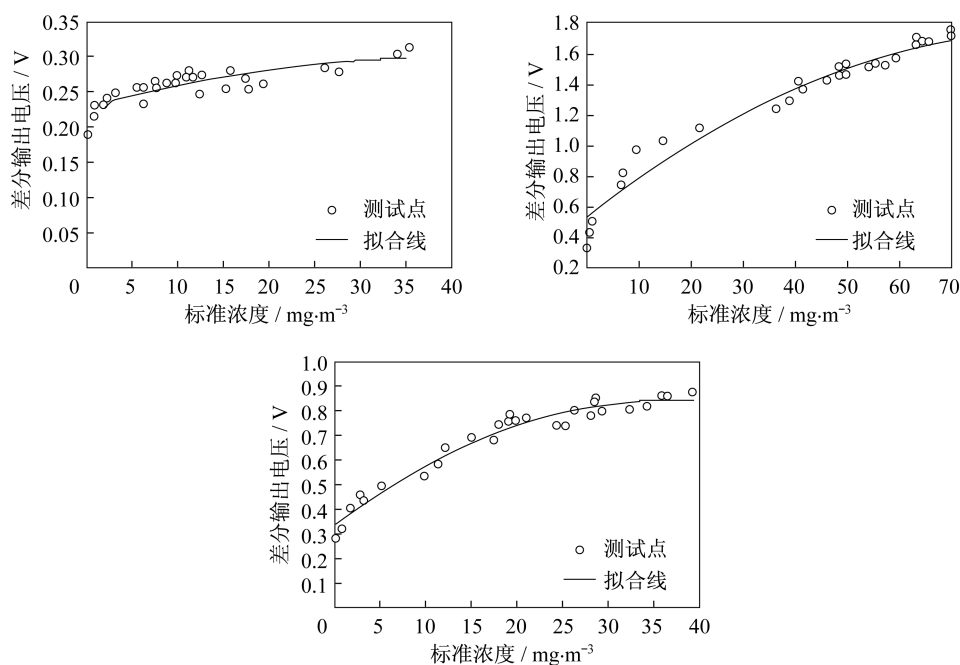


图 9 不同波长下输出电压信号随标准浓度的变化关系拟合曲线

Fig. 9 The fitting curves of output voltage signals with the standard concentration under the different input wavelengths

结果可得到不同光源下的检测灵敏度。对拟合曲线求导后分别得到

$$\frac{dV_{405}}{dC} = \frac{0.0282072}{e^{0.0483C}} \quad (8)$$

$$\frac{dV_{658}}{dC} = \frac{0.04172}{e^{0.0149C}} \quad (9)$$

$$\frac{dV_{780}}{dC} = \frac{0.017724}{e^{0.00633C}} \quad (10)$$

式中: V 为差分输出电压; C 为标准质量浓度值。

将拟合曲线的求导结果进行归一化处理,如图 10 所示,直观反映了当光源选用不同波长时,检测系统具有不同的灵敏度。

由图 5 所示的光电探测器响应曲线可知, BPX65 的响应度随着波长增加而升高,当在红外波段时达到峰值。可是在测试过程中,由于探测光路经过悬浮颗粒时会产生散射,并且波长越短,散射越强,对探测光的衰

减就越大,从而使得参考光与探测光在光电差分放大后得到的信号灵敏度就会越高。结合 BPX65 的响应曲线可知最终将在红光波段附近获得最佳响应度。

综上所述,当选用 $\lambda=658\text{ nm}$ 激光器作为光源时具有较高的测试精度以及灵敏度,因此在测量系统中选用 $\lambda=658\text{ nm}$ 可调半导体激光器作为光源。

4 实验测量与分析

比较标定后激光差分探测系统的输出结果与标定仪器的输出结果,如图 11 所示,可以看到在较小质量浓度条件下,两曲线有明显偏离,而标准浓度超过 6.95 mg/m^3 后,实测值与参考值非常接近。对于较小质量浓度条件下的偏离,应是较稀薄质量浓度与较高质量浓度对激光的不同散射规律所致。

其中,实线对应激光差分探测系统标定后的实测拟合结果,圆点对应标定仪器的结果以作参考。标准质量浓度超过 6.95 mg/m^3 之后,激光差分探测系统输出相对于标定探测仪器输出的相对误差,如图 12 所示。

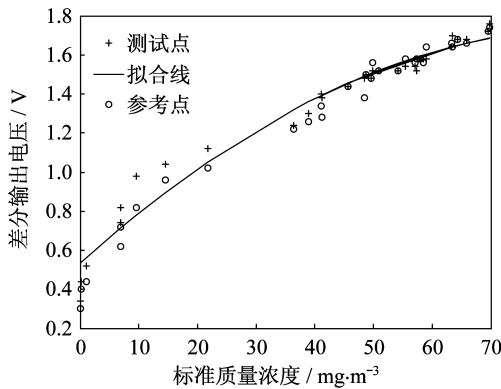


图 11 标定后实际测试结果与标定仪器测试结果比较
Fig. 11 The actual test results after calibration and the test results of calibrated instrument

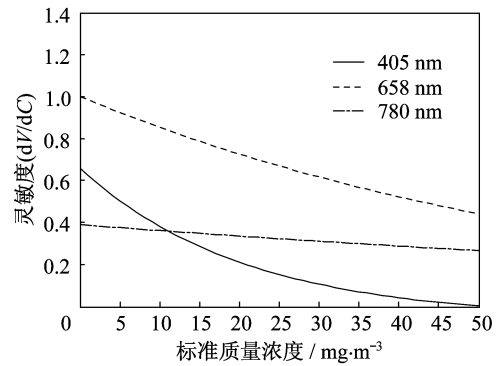


图 10 不同波长对应相同标准浓度时的灵敏度
Fig. 10 Sensitivity corresponding to the same standard concentration under the different input wavelengths

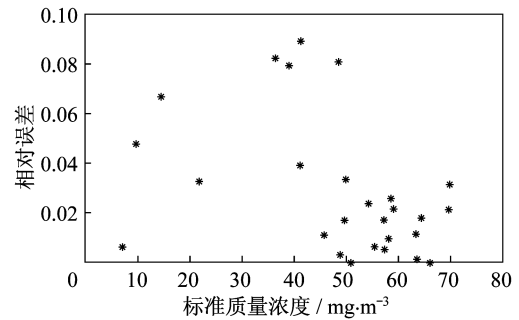


图 12 悬浮物浓度测试误差
Fig. 12 The test error of suspended matter concentration

由实验结果可知,将粉尘仪测得的质量浓度值作为标准值,由光电差分探测器输出信号计算得到的质量浓度值作为实际测量值,实测质量浓度值与标准质量浓度值的相对误差可维持在 12% 之内。

因此,经过标定之后,激光差分探测系统可以对超过 30 mg/m^3 的较高质量浓度的烟雾类气溶胶悬浮物实现相对误差在 12% 以内的质量浓度测量。

5 结 论

本文提出了一种基于激光差分探测技术的悬浮物质量浓度测量方法。通过对激光在悬浮物颗粒中传播时衰减原理的研究,获取了悬浮物颗粒质量浓度与光强衰减的关系,激光光源频率与响应度的关系以及激光器波长与探测器响应度的关系。通过标准气溶胶质量浓度测试仪对系统进行了标定,并以人工方式产生烟雾为实验媒质使用该系统进行悬浮物质量浓度测量,对超过 30 mg/m^3 的较高质量浓度的烟雾类气溶胶悬浮物实现了相对误差在 12% 以内的质量浓度测量。经过适当的改进,该测量系统可用于烟雾、粉尘等空气悬浮颗粒含量的实时测量。

测结果精度较为接近,这样就验证了结构光投影法检测光学元件的方法是可以满足通常的检测要求,具有一定的可行性。

6 结 论

本文提出的投影法光学元件面形检测技术,克服了传统检测方法中对外界环境要求严格的诸多不足之处。实验显示,该方法能够检测还原光学元件三维外貌特性,但后期仍需进一步优化图像处理算法,提高检测精度。

参考文献:

- [1] 孙国强,许增朴.用于产品造型设计的三维反求测量系统的研究[D].天津:天津科技大学,2007.
- [2] 王晓林,陈伟民,黄尚廉.光切法三维轮廓测量的原理及其应用[J].光学技术,1997,3(2):39-43.
- [3] 陈江.二目立体视觉测量系统关键技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2006.
- [4] 高文,陈熙霖.计算机视觉—算法与系统原理[M].北京:清华大学出版社,1999.
- [5] 达飞鹏,盖绍彦.光栅投影三维精密测量[M].北京:科学出版社,2011.
- [6] HIRSCHMULLER H. Improvements in real-time correlation-based stereo vision[J]. IEEE Workshop on Stereo and Multi-Baseline Vision. 2001,141-148.
- [7] 刘瑜,刘缠牢,苏海.一种基于结构光双目视觉的特征匹配算法研究[J].光学仪器,2014,36(2):161-166.
- [8] 何勇.双目视觉的车辆场景三维重建方法研究及应用[D].合肥:合肥工业大学,2009.
- [9] 程晓亮.基于双目立体视觉的三维重构研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [10] WATSON D F. Computing then-dimensional Delaunay tessellation with applications to Voronoi polytopes [J]. The Computer Journal,1981,24(2):167-172.

(编辑:张 磊)

=====

(上接第 490 页)

参考文献:

- [1] 郑龙江,李鹏,秦瑞峰,等.气体浓度检测光学技术的研究现状和发展趋势[J].激光与光电子学进展,2008,45(8):24-32.
- [2] 江福椿,朱昌平,林善明,等.气体浓度检测技术的现状和应用[J].河海大学常州分校学报,2004,18(1):16-19.
- [3] 张学典,黄显,徐可欣.差分吸收光谱反演方法在环境监测系统中的研究[J].光谱学与光谱分析,2007,27(11):2 367-2 370.
- [4] 司福祺,刘建国,谢品华,等.差分吸收光谱技术在气溶胶监测领域的应用研究[J].大气与环境光学学报,2007,2(2):131-135.
- [5] 李素文,谢品华,李玉金,等.基于小波变换的差分吸收光谱数据处理方法[J].光学学报,2006,26(11):1 601-1 604.
- [6] 赵占龙.透射式光学粉尘浓度监测技术研究及应用[D].石家庄:河北大学,2004.
- [7] 王自亮.粉尘浓度传感器的研制和应用[J].工业安全与环保,2006,32(4):24-27.
- [8] 王自亮,赵恩标,吕银庄,等.粉尘浓度光散射测量影响因素的分析[J].煤炭学报,2007,32(6):604-607.
- [9] 江晓军.光电传感与检测技术[M].北京:机械工业出版社,2011:2-3.
- [10] 刘文清,崔志成,刘建国,等.空气质量监测的高灵敏差分吸收光谱学技术[J].光学技术,2005,31(2):288-291.

(编辑:张 磊)